第41卷 第12期
2024年12月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 12
Dec. 2024

祁连山南坡植被绿度时空变化及其对气候变化和人类活动的响应

张 倩[1,2]， 曹广超[1,2,3]， 张乐乐[1,2]， 赵美亮[1,2]

(1. 青海师范大学青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室,青海 西宁 810008；
2. 青海师范大学地理科学学院,青海省自然地理与环境过程重点实验室,青海 西宁 810008；
3. 青海省人民政府-北京师范大学高原与可持续发展研究院,青海 西宁 810008)

摘　要：为探究祁连山南坡植被绿度时空变化及其对气候变化和人类活动的响应,基于GEE平台,利用算法和遥感技术,通过Sen趋势、变异系数、Hurst指数、ArcGIS空间分析以及多元回归残差等分析方法,整合多源数据产品全面解析祁连山南坡植被绿度变化的时空特征,并综合评估其未来变化趋势及稳定性,在此基础上深入探讨气候变化和人类活动对植被绿度的影响程度。结果显示:(1) 2001—2020年祁连山南坡的植被绿度总体呈上升趋势,且空间差异性显著。从稳定性分析来看,其变异系数介于0~0.84,均值为0.09,植被绿度的变化总体上处于相对稳定的状态,并且其展现出向好的态势。(2) 在影响因素方面,降水和气温均与植被绿度呈正向促进关系,其中与气温的相关性更为显著,并且通过显著性检验的区域占研究区的95.7%,表明气温对植被绿度变化起主要促进作用。(3) 人类活动对植被绿度的变化起到了积极的推动作用。整体来看,植被绿度的变化是气候变化和人类活动共同作用的结果,其中气候变化和人类活动对研究区植被绿度的相对贡献率分别为36.68%和63.32%,人类活动的相对贡献率大于气候变化,这与实施的生态工程密切相关。

关键词：植被绿度；时空变化；气候变化；人类活动；祁连山南坡

植被绿度作为量化植被绿色程度与生长状态的关键参数,通过叶绿素对光的吸收和反射特性来反映植被的健康状况。该指标不仅直观展现了地表植物数量的动态变化,还深刻揭示了地球生态环境质量的演变历程,是生态监测与评估的重要依据[1-2]。归一化植被指数(NDVI)作为衡量植被生长与地表绿度的核心指标,在生态学和环境科学研究中得到了广泛应用[3-6]。与植被覆盖度相比,植被绿度更侧重于评估植被的生长状况与健康水平,为生态保护和管理提供了更为精确的决策支持[7]。

近年来,随着遥感技术和地理信息系统的飞速发展,国内外学者对植被绿度的时空变化特性及其驱动因素展开了深入探索。在云贵高原、黄土高原、东北地区及青藏高原等地,学者们基于不同的地理背景和生态环境,对植被绿度的时空变化进行了详细分析,揭示了其变化规律及与气候、地形等因素的相互关系[1-7]。这些研究不仅丰富了对植被绿度变化的认识,还为生态保护与恢复提供了科学依据。尽管已有众多研究聚焦于植被绿度的时空变化特征,但这些研究大多侧重于植被绿度变化本身及其与特定环境因素间的联系,而缺乏对于气候变化与人类活动在植被绿度变化中所扮演的具体角色及其贡献程度的研究。祁连山南坡地处青藏高原东北边缘,其地带展现出显著的海拔梯度特征,对全球气候的暖湿化趋势表现出高度的敏感性。值得一提的是,自20世纪初祁连山自然保护区成立以来,该区域实施了一系列生态恢复工程项目,有效促进了生态环境的改善[7-16]。因此,祁连山南坡是研究植被绿度如何随气候变化和人类活动而变化的理想之地。目前,关于祁连山南坡植被绿度时空演变趋势及其与人类活动、气候变化相互关联的研究仍显不足,特别是针对祁连山南坡植被绿度变化规律的研究鲜见报道。

鉴于此,本研究深入分析祁连山南坡植被绿度

收稿日期：2024-04-21； **修订日期**：2024-10-14
基金项目：青海省自然科学基金项目(2023-ZJ-907M)
作者简介：张倩(1998-),女,硕士研究生,主要从事遥感与地理信息系统应用. E-mail: 18309740663@163.com
通讯作者：曹广超. E-mail: caoguangchao@qhnu.edu.cn

的时空演变趋势，探讨其与人类活动、气候变化的相互关联，以期更好地理解生态系统的演变机制，并为应对气候变化和生态环境保护建设提供理论支撑。具体而言，本研究基于GEE平台，利用算法和遥感技术，通过Sen趋势、变异系数、Hurst指数和多元回归残差等分析方法，整合多源数据，揭示祁连山南坡植被绿度的时空变化规律，并探讨其背后的驱动因素。本研究在当前研究领域内进行了有益的补充，并为祁连山地区的生态保护与恢复工作提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山南坡位于黄土高原与青藏高原的过渡地带（图1），地形多变，海拔介于2202~5208 m之间。它特指祁连山脉南部向阳面，地势平缓，与北坡形成鲜明对比。南坡的具体范围因研究目的和界定标准而异，广义上指青海一侧的祁连山区域，相对北坡所在的甘肃一侧[13-15]。该地域主要由高中台地、丘陵、河谷及湖泊盆地等多种地貌单元构成，其主要水系包括黑河、大通河以及布哈河等[13]，展现出典型的高原大陆性气候特征[13]。该研究区域有较长的年日照时长，约在2200~2900 h之间，年平均气温-37.1~30.5 ℃。降水主要集中在6—8月，年平均降水量为300~400 mm，且气温与降水均呈现出显著的水平与垂直梯度差异[14]。祁连山南坡作为青海省的重要畜牧业基地，不仅林草茂盛、矿产丰富、旅游资源多样，还是整个祁连山地区水源涵养的核心区域，属于国家重点生态保护区，其生态地位极为重要[15]。

1.2 数据来源与处理

本研究选用MODIS NDVI数据作为植被绿度指数的计算分析，空间分辨率为1 km，时间跨度为2001—2020年。数据预处理是在GEE云平台进行，主要包括对数据进行筛选、裁剪、均值等处理，并以最大合成法得到每年最大NDVI栅格图像[13-20]。气温和降水数据是分辨率为1 km的逐月平均数据集[19-23]，来源于国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn/）。

1.3 研究方法

1.3.1 Sen趋势分析以及Mann-Kendall检验　Sen趋势分析是非参估算线性趋势的算法[2]，用于获取2001—2020年的植被绿度的变化趋势。计算公式如下[20-26]：

$$Slope = \mathrm{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \tag{1}$$

式中：*Slope*为植被绿度的变化趋势值；i和j分别为时间序列中的时间；x_i和x_j分别为研究区内i、j时间的植被绿度值。

Mann-Kendall（M-K）显著性检验法是最常见的参数检验方法，适用性广泛，且具有不要求样品遵循特定的分布特征和不受少数异常因素的干扰等特性[26-31]，本文主要采用此技术对植被绿度的序列变化进行显著性检测，在给定明确度的α时，如果检测统计值是$|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$，则表示在α水平上的变化并不明

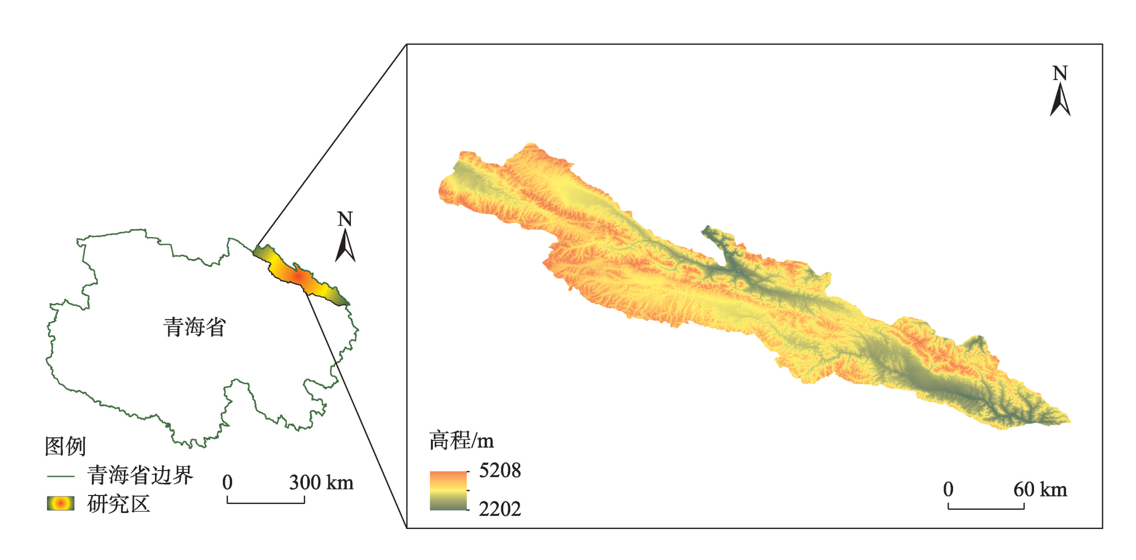


图1　研究区位置示意图

Fig. 1　Location of the study area

显；如果$|Z|>Z_{1-\alpha/2}$，则表示在α的水平上变化显著[26]。在本研究的检验中$|Z|>1.65$、1.96和2.58时，表示趋势通过的信度α分别为90%、95%和99%。

根据显著性检验结果将变化趋势分为如下5个等级：不显著减少（Sen<−0.0005，$\alpha\le95\%$）、显著减少（Sen<−0.0005，$\alpha>95\%$）、基本不变（−0.0005≤Sen≤0.0005）、显著增加（Sen>0.0005，$\alpha>95\%$）、不显著增加（Sen>−0.0005，$\alpha\le95\%$）[2,26]。

1.3.2　变异系数　基于算法计算植被绿度的变异系数，用其来表示植被绿度变化的波动状况[26−33]。计算公式为[21]：

$$C_v=\frac{\sigma \mathrm{NDVI}}{\mathrm{NDVI}_{avg}} \tag{2}$$

式中：C_v为植被绿度变异系数；σNDVI为标准差；NDVI_{avg}为均值。变异系数越小，植被绿度波动程度越小，植被绿度变化越稳定，反之则表明植被绿度越不稳定[22−26]。

1.3.3　Hurst指数分析　采用基于R/S算法的Hurst指数来定量描述祁连山南坡植被绿度变化的持续性，从而分析其未来变化趋势，即通过分析时间序列信息长期依赖性和自相关性，定量描述其变化趋势的可持续性[21]。

Hurst指数（H）一般介于0~1之间，若$0<H<0.5$，则表明植被绿度时间序列具有反持续性，即未来植被绿度的变化趋势与过去相反；若$H=0.5$，则表明植被绿度时间序列具有随机性，即未来植被绿度变化趋势与过去不存在相关性；若$0.5<H<1$，则表明植被绿度时间序列具有持续性，即未来植被绿度变化趋势与过去一致[26−31]。

1.3.4　Pearson相关分析　用Pearson相关系数估算祁连山南坡植被绿度与降水和气温的相关性，从而分析气候因素对祁连山南坡植被绿度的影响，计算公式如下[2]：

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \tag{3}$$

式中：R_{xy}为植被绿度与两个气候因子之间的相关性系数；x_i为研究时期内第i年的植被绿度值；y_i为研究时期内第i年的气温或降水量；$\bar{x}$为研究时期内多年植被绿度均值；$\bar{y}$为研究时期内气温或降水量多年均值。

1.3.5　多元回归残差分析　多元回归残差分析可以从长时序植被绿度中剔除降水和气温等因素的影响，从而分离出人类活动（如生态工程项目）对植被绿度变化的影响，其中方程残差被认为是人类活动引起的生态系统生产力的变化[26]。本研究以2001—2020年的植被绿度观测值（$\mathrm{NDVI_{obs}}$）为因变量，以2001—2020年降水量P和年平均气温T为自变量，建立二元回归模型来获得植被绿度预测值（$\mathrm{NDVI_{CC}}$），将观测值与预测值之差作为植被绿度残差值（$\mathrm{NDVI_{HA}}$），用残差值来表示人类活动（如生态工程项目）对植被绿度变化的影响。计算公式如下[26]：

$$\mathrm{NDVI_{CC}}=aP+bT+c \tag{4}$$

$$\mathrm{NDVI_{HA}}=\mathrm{NDVI_{obs}}-\mathrm{NDVI_{CC}} \tag{5}$$

式中：$\mathrm{NDVI_{CC}}$为基于回归模型的植被绿度预测值；$\mathrm{NDVI_{obs}}$为遥感影像获取的植被绿度观测值；$\mathrm{NDVI_{HA}}$为植被绿度残差值；P和T分别为研究时段内的年降水量（mm）和年平均气温（℃）；a、b、c为模型参数[30]。

依据植被绿度残差趋势值（Sr），将人类活动对植被绿度的影响划分为3个等级：促进（$Sr>0.0005$）、基本无影响（$-0.0005\le Sr\le0.0005$）、抑制（$Sr<-0.0005$）[26]。

1.3.6　植被绿度变化驱动因素判定及相对贡献率分析　为进一步精确地衡量气候变化以及诸如生态工程项目等人类活动对植被绿度产生的影响，基于气候变化和人类活动两大因素及其相互作用的变化趋势，将其分为3个等级[30−34]。这3个等级分别为：促进（>0.0005）、基本无影响（−0.0005~0.0005）和抑制（<−0.0005）[30]。在区分植被绿度驱动因素的基础上，通过残差分析方法计算各驱动因素对植被绿度变化的相对贡献率（表1），进而评估气候变化和人类活动对植被绿度变化造成的影响[30]。

2　结果与分析

2.1　祁连山南坡植被绿度时空演变分析

2.1.1　植被绿度时空变化特征　从时间序列上来看（图2），2001—2020年期间，祁连山南坡的植被绿度整体上呈现出波动上升的趋势，其斜率为0.0008 a^{-1}。在此期间，年际间的变化幅度较为显著，植被绿度的最小值0.28出现在2008年，而最大值0.32出现在2018年。其中，与2001年相比，2018年的植被绿度值从0.27增长至0.32，其增长速率为19%。

通过对祁连山南坡2001—2020年间的植被绿度取均值，可得到近20 a的植被绿度空间分布。由图3可知，祁连山南坡的植被绿度呈现出显著的空间差异性，这种差异性表现为从边缘地带开始，绿

表1 植被绿度变化的驱动因素判定标准及相对贡献率计算方法

Tab. 1 Criteria for determining driving factors of vegetation greenness change and calculation method for relative contribution rate

slope（$NDVI_{obs}$）	驱动因素	驱动因素判定标准		驱动因素的贡献率/%	
		slope（$NDVI_{CC}$）	*slope*（$NDVI_{HA}$）	气候变化	人类活动
>0	CC&HA	>0	>0	$\frac{slope(NDVI_{CC})}{slope(NDVI_{obs})}$	$\frac{slope(NDVI_{HA})}{slope(NDVI_{obs})}$
>0	CC	>0	<0	100	0
>0	HA	<0	>0	0	100
<0	CC&HA	<0	<0	$\frac{slope(NDVI_{CC})}{slope(NDVI_{obs})}$	$\frac{slope(NDVI_{HA})}{slope(NDVI_{obs})}$
<0	CC	<0	>0	100	0
<0	HA	>0	<0	0	100

注：CC为气候变化，HA为人类活动。

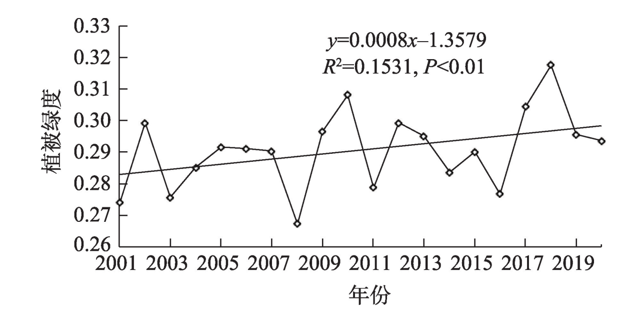


图2 2001—2020年祁连山南坡植被绿度年际变化

Fig. 2 Inter-annual changes in vegetation greenness on the southern slopes of Qilian Mountains from 2001 to 2020

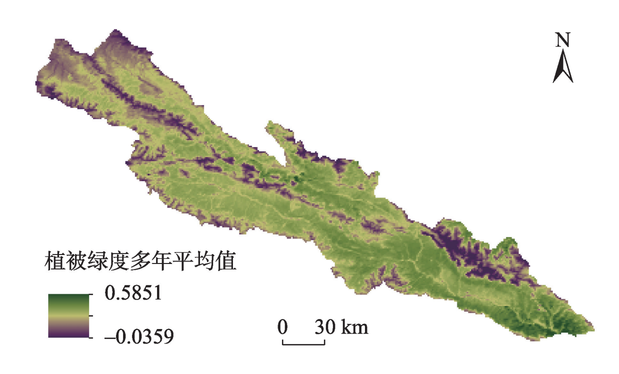


图3 2001—2020年祁连山南坡植被绿度多年均值分布

Fig. 3 Multi-year average distribution of vegetation greenness on the southern slopes of Qilian Mountains from 2001 to 2020

度逐渐降低，且自东南向西北方向递减的趋势愈发明显。这种分布特点的形成，主要受到地形地貌、气候条件等多种自然因素的共同作用。其中高植被绿度区域主要集中在研究区域的东南部，而相对较低的植被绿度则多见于海拔较高的地区。

2.1.2 植被绿度空间变化趋势 运用Sen趋势分析2001—2020年间祁连山南坡植被绿度年际变化趋势的空间特征，并结合M-K显著性检验，得出了植被绿度显著变化的统计结果（图4）。如表2所示，这期间祁连山南坡植被绿度总体上呈现出积极的改善趋势，其中植被绿化趋势自东南向西北逐渐减弱。具体而言，改善区域占据了研究区域的61%，其中极显著改善和显著改善区域各占11%，这些区域主要集中在研究区域的西北和东南部。而轻微改善区域则占据了研究区域的39%。有28%的区域植被绿度基本保持不变，仅有11%的区域出现了植被绿度的退化趋势。总体来看，与过去相比，祁连山南坡的植被绿度整体呈现出向好的态势。

2.1.3 稳定性和可持续性分析 在2001—2020年期间，祁连山南坡植被绿度的变异系数介于0~0.84，平均值为0.09。整体上，植被绿度处于相对低波动的状态，即变化相对稳定（图5a）。在2001—2020年期间（表3），祁连山南坡的低波动区域、相对低波动区域、中度波动区域、相对高波动区域和高波动区域的面积占比分别为20%、70%、9%、0.9%、0.1%。祁连山南坡植被绿度变化稳定性相对较高的区域位于研究区的东南部。

利用基于R/S分析法的Hurst指数，在像元尺度上对祁连山南坡20 a的植被绿度变化的持续性特征进行分析，进而对其未来的变化趋势进行了预测。祁连山南坡的植被绿度Hurst指数为0.43，其中$0<H<0.5$的区域占据了57%，而$0.5<H<1$的区域占据了15%（图5b）。这些数据充分表明，祁连山南坡的反持续性特征相对较强。将这一结果与Sen趋势分析结果叠加，发现祁连山南坡未来的植被绿度变化呈现出一种复杂的趋势。其中植被绿度改善呈持续性、退化呈反持续性的区域分别占12%和49%，主要

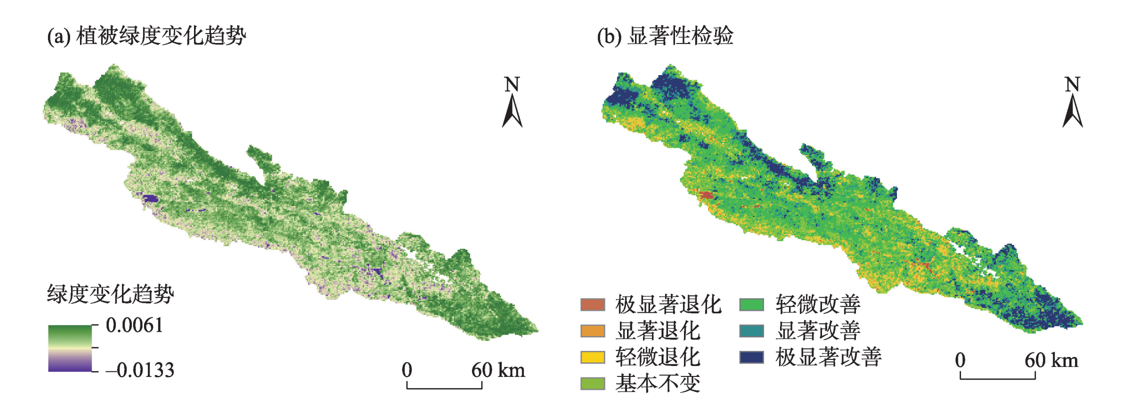


图4　2001—2020年祁连山南坡植被绿度变化趋势及显著性检验空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of trends and significance tests of vegetation greenness changes on the southern slopes of the Qilian Mountains from 2001 to 2020

表2　2001—2020年祁连山南坡植被绿度变化趋势显著性检验

Tab. 2　Significance test of trends in vegetation greenness changes on the southern slopes of Qilian Mountains from 2001 to 2020

变化趋势值*Slope*	显著性水平	变化趋势	像元数/个	比例/%
<−0.0005	<0.01	极显著退化	120	1
<−0.0005	0.01~0.05	显著退化	166	1
<−0.0005	≥0.05	轻微退化	2280	9
−0.0005~0.0005	≥0.05	基本不变	6660	28
>0.0005	≥0.05	轻微改善	9326	39
>0.0005	0.01~0.05	显著改善	2599	11
>0.0005	<0.01	极显著改善	2642	11

分布于研究区的东南部和西北部,这预示着这些区域的植被绿度未来有望得到进一步改善。然而,也存在植被绿度改善呈反持续性、退化呈持续性的区域,分别占据了8%和3%,这些区域主要位于研究区的南部,这可能意味着这些地区的植被绿度在未来可能会面临退化的风险。总体而言,尽管存在局部退化的可能,但祁连山南坡的植被绿度在未来整体呈现出改善的趋势。

2.2　植被绿度对气候变化和人类活动的响应

2001—2020年期间,气温与植被绿度的关系以极显著正相关为主,占据了研究区的63.6%(图6)。其中不显著正相关和显著性正相关区域分别占研究区总面积的4%和31%。相比之下,极显著负相关、显著负相关和不显著负相关区域的比例则较低,分别为0.1%、1%和0.3%。整体上,植被绿度与气温的正相关区域(98.6%)明显多于负相关(1.4%)区域,其相关系数均值为0.10。其中通过显著性检验的区域占研究区的95.7%。

降水与植被绿度的关系则主要表现为极显著正相关,占据了研究区的64.4%(图7)。其中不显著正相关和显著性正相关区域也占据了一定比例,分别为7.7%和21.4%。而极显著负相关、显著负相关

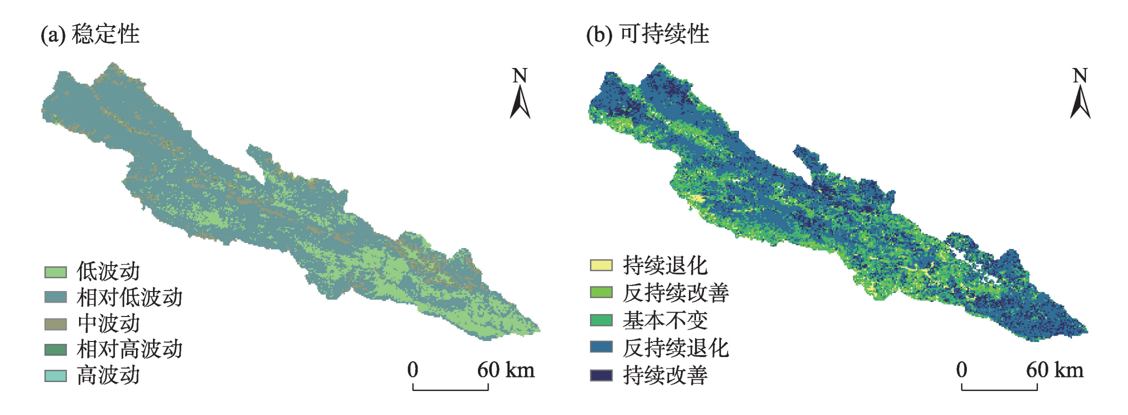


图5　2001—2020年祁连山南坡植被绿度年际变化稳定性和可持续性分析

Fig. 5　Stability and sustainability analysis of interannual variation of vegetation greenness on the southern slopes of Qilian Mountains from 2001 to 2020

表3 2001—2020年祁连山南坡植被绿度变化稳定性和可持续性

Tab. 3 Statistics on the stability of vegetation greenness changes on the southern slopes of Qilian Mountains from 2001 to 2020

变异系数			未来变化趋势		
稳定性	像元数/个	比例/%	变化趋势	像元数/个	比例/%
低波动	4739	20	持续退化	587	3
相对低波动	16873	70	反持续改善	1979	8
中波动	2179	9	基本不变	6660	28
相对高波动	198	0.9	反持续退化	11615	49
高波动	19	0.1	持续改善	2950	12

和不显著负相关区域的比例则分别为6.3%、0.1%和0.1%。整体上，植被绿度与降水的正相关的区域(93.5%)明显多于负相关(6.5%)区域，其相关系数均值为0.33。其中通过显著性检验的区域占研究区的35.5%。综合来看，相较于气温，降水与植被绿度之间的相关性相对较弱。

植被绿度的变动不仅受降水、气温等自然气候条件的制约，与人类活动的影响也紧密相连。为深入剖析这一机制，本研究借助算法技术，运用多元回归残差分析法，对祁连山南坡自2001—2020年间的植被绿度与人类活动之间的关联进行了全面而系统的研究。同时，对植被绿度残差值的变动趋势进行了分级统计。研究结果显示，祁连山南坡有48%的区域，其植被绿度残差趋势值>0.0005，这表明人类活动在这一地区过去20 a的植被绿度增长中发挥了显著的促进作用(图8)。同时，有15%的区域其植被绿度残差趋势值<-0.0005，这些区域主要集中在祁连山南坡的西南边缘。然而，仍有37%的区域，人类活动对植被绿度的影响并不明显。综合考虑以上结果，可以看出，尽管部分地区受到人类活动的负面影响，但整体上，人类活动对祁连山南坡的植被绿度变化起到了促进作用。

2.3 气候变化和人类活动对植被绿度变化的相对贡献

为进一步量化气候因子和人类活动对植被绿度变化的影响，本研究基于算法通过多元回归残差

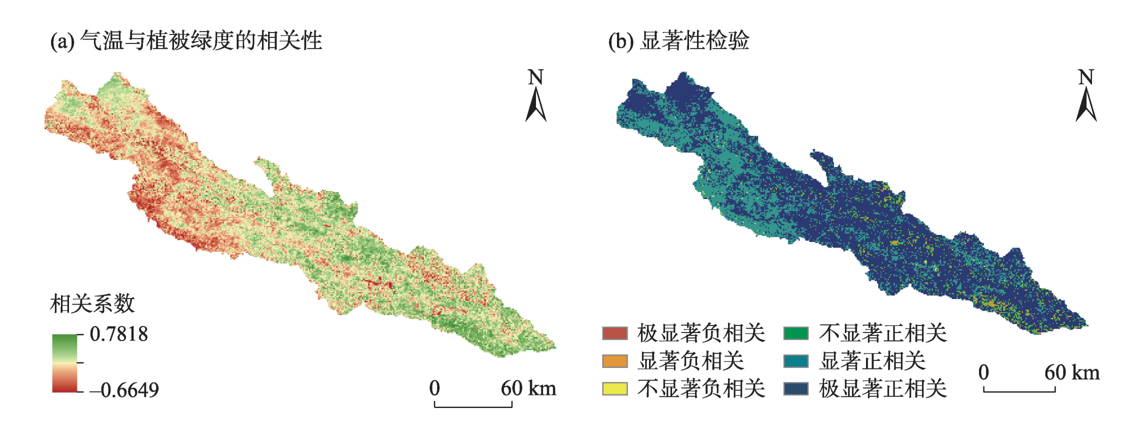


图6 植被绿度与气温之间的相关系数及显著性检验空间分布

Fig. 6 Correlation coefficient and significance test spatial distribution between vegetation greenness and temperature

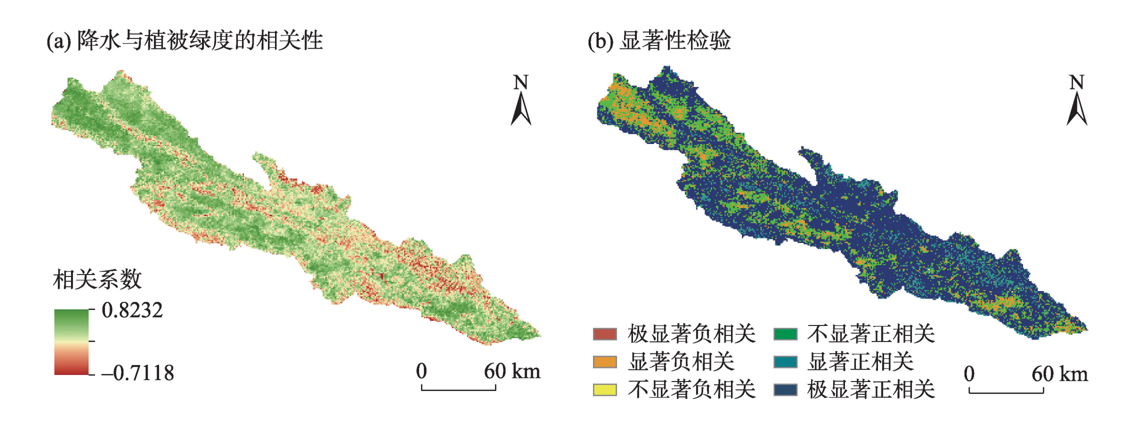


图7 植被绿度与降水之间的相关系数及显著性检验空间分布

Fig. 7 Correlation coefficient and significance test spatial distribution between vegetation greenness and precipitation

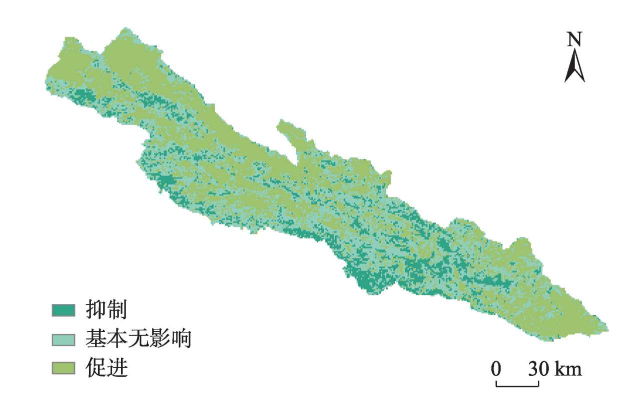


图8　祁连山南坡植被绿度残差趋势空间分布

Fig. 8　Spatial distribution of residual trend of vegetation greenness on the southern slopes of Qilian Mountains

分析将气候变化与人类活动对植被绿度的影响进行分离,量化气候变化与人类活动对其植被绿度的相对贡献度。其中气候变化和人类活动对研究区植被绿度的相对贡献率分别为36.68%和63.32%,由图9a可知,气候变化的相对贡献率主要集中在0~40%范围内,占研究区总面积的65%,气候变化的相对贡献率为20%~40%的区域占比为31%,主要分布于研究区以南的局部地区,相对贡献率为40%~60%的区域占比为14%,主要分布于研究区的东南部地区,相对贡献率为60%~100%的区域占比为21%且主要分布在研究区中部的局部地区。

由图9b可知,人类活动对祁连山南坡植被绿度变化的相对贡献率主要集中在60%~100%的范围内,占研究区总面积的65%,说明人类活动对祁连山南坡植被绿度变化的影响主要以促进为主,相对贡献率在60%~80%的区域占比为31%,主要分布于研究区东北和西北部的局部地区,人类活动对植被绿度的相对贡献率在80%~100%的区域占比为34%,分布于研究区的大部分地区。整体上而言,研究区20 a的气候变化和人类活动对其植被绿度的影响均以正向促进为主,其中人类活动对植被绿度的相对贡献率大于气候变化。

2.4　植被绿度变化驱动因素判定

通过应用多元回归残差分析,并依据驱动因素判定标准,对2001—2020年间祁连山南坡植被绿度变化的驱动因素进行了判定。判定结果如表4和图10所示。研究结果显示,祁连山南坡的植被绿度变化受到气候变化和人类活动的共同影响,这一影响区域占研究区总面积的69%。其中因气候变化和人类活动共同作用而导致植被绿度改善和退化的区域占比分别为64%和5%。此外,仅由人类活动导致植被绿度变化的区域占研究区总面积的19%,其中因人类活动使得植被绿度改善和退化的区域占比分别为4%和15%。而仅由气候变化导致植被绿度变化的区域占研究区总面积的12%,其中导致植被绿度改善和退化的区域占比分别为11%和1%。综上所述,过去20 a间,祁连山南坡的植被绿度变化主要受到气候变化和人类活动的共同作用,其中人类活动的影响更为显著。

3　讨论

本研究表明,祁连山南坡的植被绿度整体上呈现出上升趋势。然而,这种改善在空间上具有明显的空间异质性,这一发现与前人的研究结果相吻合[13]。本研究基于变异系数的分析方法对祁连山南坡植被绿度变化的稳定性和可持续性进行综合评估,结果

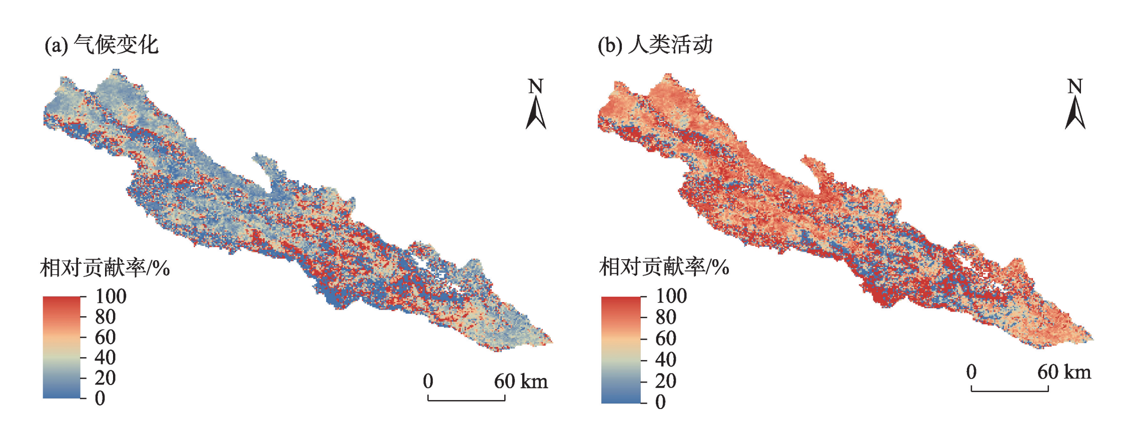


图9　气候变化(a)和人类活动(b)对祁连山南坡植被绿度变化的相对贡献率

Fig. 9　Relative contribution rates of climate change (a) and human activities (b) to vegetation greenness changes on the southern slopes of the Qilian Mountains

表4　2001—2020年祁连山南坡植被绿度变化的驱动因素统计

Tab. 4　Statistical analysis of driving factors for vegetation greenness changes on the southern slopes of Qilian Mountains from 2001 to 2020

Slope($NDVI_{obs}$)	驱动因素	像元数/个	比例/%
>0	气候变化和人类活动	14942	64
>0	气候变化	2501	11
>0	人类活动	952	4
<0	气候变化和人类活动	1218	5
<0	气候变化	190	1
<0	人类活动	3498	15

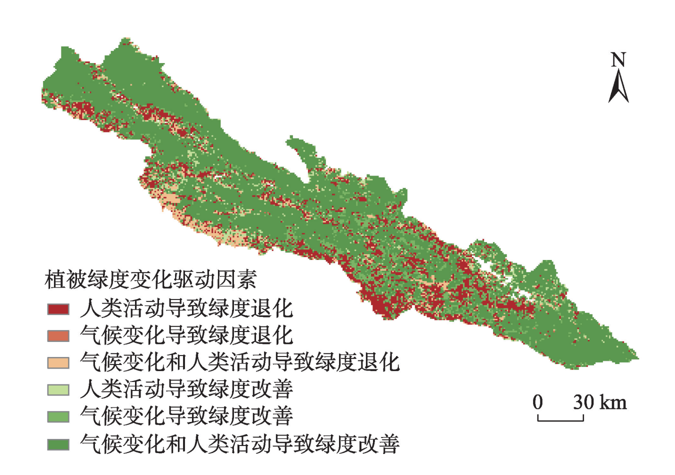


图10　2001—2020年祁连山南坡植被绿度变化的驱动因素空间分布

Fig. 10　Spatial distribution of driving factors of vegetation greenness change on the southern slopes of Qilian Mountain from 2001 to 2020

表明，祁连山南坡的植被绿度变化整体波动相对较小，表明该区域的植被绿度处于一种较为稳定的状态。这显示了在局部差异存在的情况下，整体植被绿度的改善呈现出稳定且持续的态势，体现了一种积极的发展趋势。这表明，尽管面临气候变化、人类活动等多元因素的挑战，祁连山南坡的植被系统依然展现出了较强的适应性和恢复力。

通过分析Hurst指数[26]，发现祁连山南坡的反持续性现象显著，且在未来变化中，反持续退化趋势占据了主导，占据了研究区的49%，这一区域主要集中于研究区的西北部。相对而言，植被绿度改善的持续性区域仅占12%，而退化呈反持续性的区域则占据了49%，这些区域主要分布在研究区的东南部和西北部。这表明，未来祁连山南坡的植被绿度有可能得到一定的改善。然而，不容忽视的是，研究还揭示了在该区域内靠近城镇的部分地区，其植被绿度在未来可能面临退化的生态压力。这凸显了在城镇化进程中，人类活动对区域生态环境产生一定的影响[13-15]。这种影响不仅限于直接的物理破坏，更包括了对生态系统稳定性和自我恢复能力的潜在威胁。因此，持续有效地通过人工调整优化生态环境资源利用，提升利用效率，对祁连山南坡生态保卫及可持续发展至关重要[30-37]。祁连山南坡植被绿度变化复杂，受多因素协同影响，包括非生长季、气候滞后效应等。未来研究需综合考虑时间尺度、多种气候因素，并重视植被绿度对局地气候的响应，以深入理解其内在规律，为生态保护与可持续发展提供科学依据。

在青藏高原暖湿化趋势加剧的背景下[16]，本研究深入分析了祁连山南坡植被绿度变化的主要驱动因素。结果显示，降水和气温作为关键气象因子，均对植被绿度产生显著正相关影响。气温适度上升为植物生长提供了更适宜的条件，而降水量增加则有效补充了土壤水分，共同促进了植被绿度的提升。值得注意的是，植被绿度对气温变化的敏感度高于降水。此外，研究结果中的残差趋势揭示了人类活动对植被绿度的积极影响。多元回归残差系数的波动上升表明，人类活动的正向驱动效应在逐步增强，这主要得益于祁连山南坡地区实施的一系列生态工程[13-15]。这些工程，如退耕还林还草、封山禁牧等，在保护生态环境的同时，也为植被生长创造了更好的条件，显著提升了植被绿度和生态质量。

然而，人类活动对植被绿度的影响并非全然积极。随着人类活动的增加，尤其是畜牧业的发展，草地的生态承载能力面临巨大挑战。过度放牧可能导致草地退化、植被稀疏，甚至引发土壤侵蚀、水源减少等生态问题[15]。因此，在推进生态环境质量提升的过程中，必须采取有效措施调控放牧规模，维护"牧-草"生态平衡，如制定科学合理的放牧制度、严格限制放牧时间和强度，并推广科学的饲养方式。同时，加强对草地生态系统的监测和研究，及时发现并解决潜在问题，确保生态系统健康稳定。

人类活动对植被绿度的影响复杂多面，除直接影响外，还通过改变土地利用方式、水资源利用等手段间接作用。因此，在祁连山南坡生态环境保护

和可持续发展中，需全面考虑并妥善处理这些影响因素。未来，应继续推进退耕还林还草、封山禁牧等生态工程，并加强监管和执法力度，确保工程有效实施和长期效益。同时，关注并降低自然灾害对绿化和生态工程的潜在破坏，提高植被绿度韧性[28-37]。此外，还需深入研究人类活动对植被绿度的影响机制，以制定科学合理的生态环境保护策略，实现人与自然的和谐共生。

4 结 论

本研究基于GEE平台，利用算法和遥感技术对祁连山南坡植被绿度时空分异和变化趋势进行了分析，探讨了植被绿度对降水、气温的响应机制，并量化了人类活动对研究区植被绿度变化的影响。得出如下结论：

(1) 过去20 a间，祁连山南坡的植被绿度总体呈现出上升与改善的明显趋势。此外，从地理空间分布来看，植被绿度呈现出从东南向西北逐渐递减的态势。

(2) 从整体来看，祁连山南坡的植被绿度保持在一个相对稳定且波动较小的状态，其变化趋势表现出稳定向好的特点，这预示着未来植被绿度有望持续提升并扩大覆盖范围。

(3) 植被绿度与降水和气温均呈现正向促进关系，其中与气温的相关性更为显著，强于降水。同时，人类活动对植被绿度的变化也起到了显著的促进作用。从整体来看，植被绿度的变化是气候变化和人类活动共同作用的结果。其中相对贡献率的分析表明，人类活动对植被绿度的相对贡献率相比于气候变化的相对贡献率更大。

参考文献(References)：

[1] 李慧, 魏兴萍, 蔡云丽, 等. 重庆石漠化和非石漠化区植被绿度时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 288-297. [Li Hui, Wei Xingping, Cai Yunli, et al. Spatial and temporal variation characteristics of vegetation greenness in rocky desertification and non-rocky desertification areas of Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 288-297.]

[2] 曹晓云, 祝存兄, 陈国茜, 等. 2000—2021年柴达木盆地地表绿度变化及地形分异研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(6): 1080-1090. [Cao Xiaoyun, Zhu Cunxiong, Chen Guoqian, et al. Surface greenness change and topographic differentiation over Qaidam Basin from 2000 to 2021[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(6): 1080-1090.]

[3] 杨航, 马彩虹, 滑雨琪, 等. 宁夏草地绿度时空变化图谱及驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 228-239. [Yang Hang, Ma Caihong, Hua Yuqi, et al. Spatiotemporal variation atlas of grassland greenness in Ningxia and its driving factors[J]. Research on Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 228-239.]

[4] 张宇, 余振, 栾军伟, 等. 1982—2020年东北森林带植被绿度时空变化特征[J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6670-6681. [Zhang Yu, Yu Zhen, Luan Junwei, et al. Spatiotemporal variations of vegetation greenness in the forest belt of Northeast China during 1982-2020[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6670-6681.]

[5] 朱玉英, 张华敏, 丁明军, 等. 青藏高原植被绿度变化及其对干湿变化的响应[J]. 植物生态学报, 2023, 47(1): 51-64. [Zhu Yuying, Zhang Huamin, Ding Mingjun, et al. Changes of vegetation greenness and its response to drought-wet variation on the Qingzang Plateau[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(1): 51-64.]

[6] 董庆栋, 陈超男, 殷浩然, 等. 秦巴山地植被绿度特征及其对地表水热的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(3): 1090-1101. [Dong Qingdong, Chen Chaonan, Yin Haoran, et al. Vegetation greenness characteristics in the Qinling-Daba Mountains and its response to surface hydrothermal[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1090-1101.]

[7] 邬瑞鑫, 蒙仲举, 孟芮冰, 等. 1987—2022年库布齐沙漠沙化土地时空动态及趋势预测[J]. 地理科学, 2024, 44(8): 1448-1458. [Wu Ruixin, Meng Zhongju, Meng Ruibing, et al. Spatial-temporal dynamics and trend prediction of desertification land in the Hobq desert from 1987 to 2022[J]. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(8): 1448-1458.]

[8] 张巧凤, 于红博, 黄方. 蒙古高原干旱时空特征及对植被物候的累积影响[J]. 干旱区研究, 2024, 41(9): 1548-1559. [Zhang Qiaofeng, Yu Hongbo, Huang Fang. The spatiotemporal dynamics of drought and the cumulative impact on vegetation phenology in the Mongolian Plateau[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(9): 1548-1559.]

[9] 吴思源, 郝利娜. 2001—2021年黄河流域植被覆盖变化及其驱动因素[J]. 干旱区研究, 2024, 41(8): 1373-1384. [Wu Siyuan, Hao Lina. Changes in vegetation cover and driving factors in the Yellow River Basin from 2001 to 2021[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(8): 1373-1384.]

[10] 史天艺, 张萌萌, 蒲阳, 等. 毛乌素沙地植被NDVI动态及对降水的多时空响应[J]. 干旱区研究, 2024, 41(8): 1395-1404. [Shi Tianyi, Zhang Mengmeng, Pu Yang, et al. Changes in NDVI and its multiscale spatiotemporal responses to precipitation in the Mu Us Desert[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(8): 1395-1404.]

[11] 吴万民, 刘涛, 陈鑫. 西北干旱半干旱区NDVI季节性变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 1969-1981. [Wu Wanmin, Liu Tao, Chen Xin. Seasonal changes of NDVI in the arid and semi-arid regions of Northwest China and its influencing factors[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(12): 1969-1981.]

[12] 刘爽, 宫鹏. 2000—2010年中国地表植被绿度变化[J]. 科学通报, 2012, 57(16): 1423-1434. [Liu Shuang, Gong Peng. Change of surface cover greenness in China between 2000 and 2010[J]. Sci-

ence Bulletin, 2012, 57(16): 1423-1434.]

[13] 童珊, 曹广超, 闫欣, 等. 祁连山南坡2000—2020年植被覆盖时空演变及其驱动因素分析[J]. 山地学报, 2022, 40(4): 491-503. [Tong Shan, Cao Guangchao, Yan Xin, et al. Spatial-temporal evolution of vegetation cover and its driving factors on the south slope of Qilian Mountains, China from 2000 to 2020[J]. Mountain Research, 2022, 40(4): 491-503.]

[14] 邱巡巡, 曹广超, 张卓, 等. 高寒农田土壤有机碳和全氮密度垂直分布特征及其与海拔的关系[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 623-630. [Qiu Xunxun, Cao Guangchao, Zhang Zhuo, et al. Vertical distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen density in alpine farmland and their relationships with altitude [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(3): 623-630.]

[15] 张卓. 祁连山南坡生态系统碳源/汇特征及碳库影响因素研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2022. [Zhang Zhuo. Research on the Carbon Source/Sink Characteristics of the Ecosystem on the Southern Slope of the Qilian Mountains and Its Effect Factors of Carbon Pool[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2022.]

[16] 范智高, 文雯, 史红人, 等. 青藏高原暖湿复合事件时空变化特征及其对生态环境质量的影响[J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(4): 48-55. [Fan Zhigao, Wen Wen, Shi Hongren, et al. Spatial and temporal variation characteristics of warm-wet composite events on the Qinghai-Tibet Plateau and their impact on ecological environment quality[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2023, 43(4): 48-55.]

[17] 陈怡洁, 陈瑜. 黄河流域甘肃段NDVI时空变化及其影响因素分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(3): 89-92. [Chen Yijie, Chen Yu. Spatial-temporal variation of NDVI in Gansu section of the Yellow River Basin and its influencing factors[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2024, 47(3): 89-92.]

[18] 马鹏飞, 张安兵, 王贺封, 等. 基于改进遥感生态指数的矿区生态环境监测及驱动因素分析[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(12): 1580-1590. [Ma Pengfei, Zhang Anbing, Wang Hefeng, et al. Ecological environment and driving factors analysis of mining areas based on improved remote sensing ecological index[J]. Journal of Ecology and Rural Sciences, 2023, 39(12): 1580-1590.]

[19] 付沙沙, 彭威, 邵爱梅, 等. 秦巴山区夏季NDVI变化特征及其对气候因子的响应[J]. 干旱区研究, 2023, 40(10): 1563-1574. [Fu Shasha, Peng Wei, Shao Aimei, et al. Variations in the NDVI characteristics during the summer and the climatic factor responses in the Qinling-Daba Mountains[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(10): 1563-1574.]

[20] 艾丽亚, 王永芳, 郭恩亮, 等. 基于GEE的大青山国家级自然保护区NDVI变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(8): 1279-1290. [Ai Liya, Wang Yongfang, Guo Enliang, et al. NDVI change and its influencing factors of Daqingshan National Nature Reserve based on GEE[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(8): 1279-1290.]

[21] 张华, 安慧敏. 基于GEE的1987—2019年民勤绿洲NDVI变化特征及趋势分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 28-36. [Zhang Hua, An Huimin. Analysis of NDVI variation characteristics and trend of Minqin Oasis from 1987 to 2019 based on GEE[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 28-36.]

[22] 马浩文, 王永芳, 郭恩亮. 基于GEE的翁牛特旗土地沙漠化遥感监测[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 504-516. [Ma Haowen, Wang Yongfang, Guo Enliang. Remote sensing monitoring of aeolian desertification in Ongniud Banner based on GEE[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 504-516.]

[23] 吴运力, 张钰, 田佳榕. 气候变化和人类活动对内蒙古高原不同植被类型NDVI的影响[J]. 中国农业气象, 2023, 44(12): 1155-1168. [Wu Yunli, Zhang Yu, Tian Jiarong. Impacts by climate change and human activities on NDVI in different vegetation types across the Inner Mongolia plateau[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2023, 44(12): 1155-1168.]

[24] 张紫荆, 华丽, 郑萱, 等. 基于GEE平台与Sentinel-NDVI时序数据江汉平原种植模式提取[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 196-202. [Zhang Zijing, Hua Li, Zheng Xuan, et al. Extraction of cropping patterns in Jianghan Plain based on GEE and Sentinel-NDVI time series data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(1): 196-202.]

[25] 文妙霞, 何学高, 刘欢, 等. 基于地理探测器的宁夏草地植被覆被时空分异及驱动因子[J]. 干旱区研究, 2023, 40(8): 1322-1332. [Wen Miaoxia, He Xuegao, Liu Huan, et al. Analysis of the spatiotemporal variation characteristics and driving factors ofgrassland vegetation cover in Ningxia based on geographical detectors [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(8): 1322-1332.]

[26] 程兀杰, 孟妮娜, 蔡昕楠, 等. 陕西省NDVI时空变化及其对气候和人类活动的响应[J]. 人民黄河, 2023, 45(4): 28-34. [Cheng Wujie, Meng Nina, Cai Xinnan, et al. Temporal and spatial variation of NDVI in Shaanxi Province and its response to climate change and human activities[J]. Yellow River, 2023, 45(4): 28-34.]

[27] Kulesza K, Ho ciło A. Temporal patterns of vegetation greenness for the main forest-forming tree species in the European temperate zone[J]. Remote Sensing, 2024, 16(15): 2844-2844.

[28] Zhao W L, Wang H Y, Zhang H F, et al. Precipitation and anthropogenic activities regulate the changes of NDVI in Zhegucuo Valley on the southern Tibetan Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2024, 21(2): 607-618.

[29] Ji S T, Han S X, Hu J X, et al. Temporal-difference graph-based optimization for high-quality reconstruction of MODIS NDVI data [J]. Remote Sensing, 2024, 16(15): 2713.

[30] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974. [Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 961-974.]

[31] 江慧娴, 董文杰. 气候变化和人类活动对华北地区植被NDVI的影响研究[J]. 高原气象, 2024, 43(5): 1312-1328. [Jiang Huixian, Dong Wenjie. Impacts of climate change and human activities on NDVI change in North China[J]. Plateau Meteorology, 2024, 43 (5): 1312-1328.]

[32] 金岩松, 金凯, 王飞, 等. 气候变化和人类活动对东部沿海地区NDVI变化的影响分析[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3329−3342. [Jin Yansong, Jin Kai, Wang Fei, et al. Impacts of climate change and human activities on NDVI change in eastern coastal areas of China[J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3329−3342.]

[33] 夏凯, 黄义忠. 基于MODIS-NDVI的云南省植被时空变化及驱动因素分析[J]. 南方农业学报, 2023, 54(11): 3427−3437. [Xia Kai, Huang Yizhong. Spatiotemporal changes and driving factors of vegetation in Yunnan based on MODIS-NDVI[J]. Journal of Southern Agricultural, 2023, 54(11): 3427−3437.]

[34] Dong J B, Yin T T, Liu H X, et al. Vegetation greenness dynamics in the Western Greater Khingan range of Northeast China based on dendrochronology[J]. Biology, 2022, 11(5): 679.

[35] Xue F, Hu Y N. Diverse responses of vegetation greenness and productivity to land use and climate change: A comparison of three urban agglomerations in China[J]. Sustainability, 2024, 16(14): 5900−5900.

[36] 燕丹妮, 武心悦, 王博恒, 等. 1982—2015年黄土高原植被变化特征及归因[J]. 生态学报, 2023, 43(23): 9794−9804. [Yan Danni, Wu Xinyue, Wang Boheng, et al. Characteristics and driving forces of changes in vegetation coverage on the Loess Plateau, 1982−2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9794−9804.]

[37] 高艺菲. 全球植被绿度年际波动性及其演化[D]. 兰州: 兰州大学, 2023. [Gao Yifei. Global Vegetation Greenness Interannual Variability and Its Evolvement[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.]

Spatiotemporal changes in vegetation greenness on the southern slopes of the Qilian Mountains and their responses to climate change and human activities

ZHANG Qian[1,2], CAO Guangchao[1,2,3], ZHANG Lele[1,2], ZHAO Meiliang[1,2]

(1. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Ministry of Education, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 2. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: In this study, we investigated the spatiotemporal changes in vegetation greenness on the southern slopes of the Qilian Mountains and their responses to climate change and human activities. Utilizing the Google Earth Engine platform, we applied algorithms and remote sensing technologies to analyze these changes. By employing Sen's trend analysis, the coefficient of variation, the Hurst index, ArcGIS spatial analysis, and multiple residual regression methods, we integrated multisource data products to comprehensively analyze the characteristics of vegetation greenness changes. Additionally, we assessed future trends and stability while thoroughly examining the influences of climate change and human activities. The results indicated the following: (1) From 2001 to 2020, vegetation greenness on the southern slope of the Qilian Mountains exhibited an overall upward trend, accompanied by significant spatial variations. Stability analysis revealed that the coefficient of variation ranged from 0 to 0.84, with a mean of 0.09, indicating that changes in vegetation greenness remained relatively stable and exhibited a positive trend. (2) Regarding influencing factors, both precipitation and temperature exhibited a positive correlation with vegetation greenness, with temperature showing a more pronounced effect. Notably, 95.7% of the study area passed the significance test, highlighting that temperature primarily drives changes in vegetation greenness. (3) Human activities have positively influenced changes in vegetation greenness. Overall, these changes result from the combined effects of climate change and human activities, with relative contribution rates of 36.68% for climate change and 63.32% for human activities. The higher contribution rate of human activities is closely linked to the implementation of ecological engineering initiatives.

Keywords: vegetation greenness; spatiotemporal change; climate change; human activities; southern slopes of the Qilian Mountains